

위성항법시스템 서비스 및 신호 현황

Status of Navigation Satellite System Services and Signals

한가희 (K. Han, kahee.han@etri.re.kr)	위성항법연구실 연구원
방유진 (E. Bang, eugene.bang@etri.re.kr)	위성항법연구실 선임연구원
임형수 (H. Lim, lim@etri.re.kr)	위성항법연구실 책임연구원
이상욱 (S. Lee, slee@etri.re.kr)	위성항법연구실 책임연구원
박승근 (S. Park, seungkp@etri.re.kr)	전파연구본부 책임연구원/본부장

ABSTRACT

Positioning, navigation, and timing information has become a key element in the national core infrastructure and for emerging technologies, such as autonomous driving, lunar exploration, financial systems, and drones. Therefore, the provision of that information by navigation satellite systems is becoming increasingly important. Existing systems such as GPS (Global Positioning System), GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System), and BDS (BeiDou Navigation Satellite System) also provide augmentation, safety-of-life, search & rescue and short message communication and authentication services to increase their competitiveness. Those services and the signals generated for their provision have their own purpose and requirements. This article presents an overview of existing or planned satellite navigation satellite system services and signals, aiming to help understand their current status.

KEYWORDS 서비스, 위성항법시스템, 측위, 항법, 항법신호

I. 서론

1. 위성항법시스템 개요

위성항법시스템(GNSS: Global Navigation Satellite System)은 다수의 인공위성으로 구성된 위성군(Constellation)에서 항법 및 측위에 사용되는 타이밍 및 궤도 정보를 전파를 통해 방송함으로써 전 세계 어디

에서나 사용자에게 위치, 항법 및 시각 정보(PNT: Positioning, Navigation and Timing)를 제공하는 시스템이다. GNSS는 지구 위 고도 20,000~40,000km 사이의 궤도를 돌며 신호를 방송하는 위성군을 뜻하는 우주 부문(Space Segment)과 신호를 수신하는 지상 제어 부문(Ground Segment) 및 GNSS 사용자 부문(User Segment)으로 구성된다.

현재 배치된 항법 위성군에는 미국의 GPS(Global

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2023.J.380206>

* 본 논문은 2023년도 한국전자통신연구원 연구운영비 지원사업의 재원으로 수행된 연구결과임[23ZH1100, 연결의 한계를 극복하는 초연결 입체통신 기술 연구].



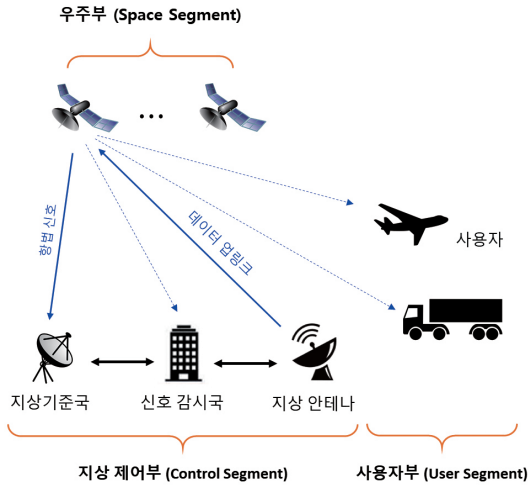


그림 1 위성항법시스템 구성

Positioning System), 러시아의 GLONASS, EU의 Galileo 및 중국의 BDS(BeiDou Satellite Navigation System) 등 전 지구적 사용자에게 PNT 서비스를 제공하는 위성군과 두 개의 지역 시스템인 일본의 QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) 및 인도의 NavIC(Navigation with Indian Constellation) 등 지역 PNT 서비스를 위한 위성군이 있으며 각각 다른 국가에 의해 관리된다(그림 1).

GPS는 미 국방부가 군사용으로 개발하기 시작하여 1978년 첫 번째 GPS 위성인 NAVSTAR 발사 이후 총 31기의 위성을 기반으로 정상 운용 중이다[1]. GLONASS는 2011년 총 24기의 위성군을 기반으로 FOC(Full Operational Capability)를 재개 후 서비스를 제공하고 있다[2]. Galileo는 공공 서비스 중심의 기존 시스템과 달리 민간 서비스를 중심으로 개발이 착수되어 2024년까지 총 30기의 위성 배치를 기반으로 한 FOC를 목표로 개발 중인 시스템이며, 2012년 이후 현대화 프로그램이 진행 중이다[3]. BDS는 2020년 총 35기의 위성 배치를 기반으로 전 지구적 위성항법시스템인 BDS-3를 구축하여 서비스를 제

공 중이다[4].

이외에도 일본의 QZSS는 자국 내에서의 GPS 서비스를 보완할 목적으로 GPS와 호환 및 상호운영이 가능하도록 설계된 4기의 QZSS 위성을 배치하였으나, 현재는 2023년까지 3기를 추가하여 총 7기의 위성 배치를 기반으로 한 FOC가 계획되고 있다[5]. 인도의 NavIC은 2020년까지 총 7기의 위성이 배치되어 운용되고 있으며, 향후 5기의 추가적인 위성 배치를 통해 서비스 확장을 계획하고 있다[6].

국내에서는 2035년에 총 8기(경사지구동기궤도 위성 6기와 지구정지궤도 위성 2기)의 위성 배치를 목표로 한국형 위성항법시스템(KPS: Korean Positioning System) 구축 사업이 시작되었다[7].

2. 위성항법시스템 주요 서비스

가. PNT 서비스

PNT 서비스는 위성항법시스템의 기본이 되는 서비스로서, 지상 사용자를 대상으로 측위, 항법 및 시각동기를 위한 정보를 제공한다. PNT 서비스는 일반 사용자를 대상으로 하는 공개서비스와 정부에 의해 허가된 사용자만을 대상으로 하는 접근제한서비스로 분류된다. 접근제한서비스는 주로 군용, 공공안전 또는 상업용 수신기를 대상으로 하며, 암호화되어 일반 사용자는 사용이 불가능하다. 현재 모든 기존 위성항법시스템은 공개서비스를 제공하고 있으며, 접근제한서비스는 QZSS를 제외한 모든 위성항법시스템에서 제공하고 있다.

나. 보정 서비스

보정 서비스는 높은 정확도를 요구하는 일반 사용자를 대상으로 공개서비스 신호의 측정 오차를 보정하기 위한 정보를 제공하며, 요구되는 위치 정확도 수준에 따라 미터급 및 센티미터급 서비스로

분류된다. 현재 Galileo, BDS, QZSS는 센티미터급 서비스를 제공하고 있으며, 미터급 서비스는 QZSS만을 통해 제공되고 있다.

한편, 민간 항공기를 대상으로 하는 보정 서비스는 SBAS(Satellite Based Augmentation System)를 통해 제공된다. SBAS는 ICAO(International Civil Aviation Organization) 표준을 따르며, 미국 WAAS(Wide Area Augmentation System)와 같이 별도의 시스템으로 구축되거나, 일본 MSAS(Multi-functional Satellite Augmentation System)와 같이 위성항법시스템의 하위 시스템으로 위치한다.

다. 재난안전 서비스

위성항법시스템을 통해 제공되는 재난안전을 위한 서비스로는 회신링크를 포함한 국제 탐색구조서비스(COSPAS-SARSAT)와 재난재해 경보서비스가 있다.

탐색구조서비스는 구조요청 신호를 탐색구조시설로 중계하고, 이에 대한 구조활동 정보를 회신링크에 해당하는 항법메시지를 통해 구조요청자에게 제공한다. 현재 회신링크를 포함한 국제 탐색구조서비스는 Galileo 및 BDS에서 제공하고 있으며, GLONASS는 K2 위성부터 서비스를 제공할 예정이다[8]. NavIC은 탐색구조서비스의 회신링크만 제공한다.

재난재해 경보서비스는 해당 위성항법시스템의 서비스 지역에서 발생하는 지진, 해일 등의 재난재해 경보를 항법메시지를 통해 제공하며, 현재 NavIC 및 QZSS를 통해 제공되고 있다.

라. 인증 서비스

인증 서비스는 비암호화 항법신호에 대한 기만 공격에 대응하여 공격자가 아닌 실제 위성으로부터 송출된 신호인지 사용자가 검증할 수 있는 기능을

제공한다. 사용자는 수신한 항법신호의 항법메시지 또는 확산 코드를 인증함으로써 기만 여부를 판단할 수 있다. 현재 인증 서비스를 제공 중인 위성항법시스템은 없으나, Galileo는 2023년부터 초기 서비스 제공을 계획하고 있으며, GPS는 2023년 발사 예정인 NTS-3(Navigation Technology Satellite-3) 위성을 통해 시험 송출할 예정이다[9,10].

마. 단문 메시지 서비스

단문 메시지 서비스는 지상 사용자-항법위성-지상국 간의 양방향 통신 서비스이다. 사용자는 항법 위성을 거쳐 지상국으로 향하는 in-bound 링크를 통해 단문 메시지를 전송하고, out-bound 링크를 통해 지상국으로부터 전송되는 단문 메시지를 수신할 수 있다[11]. 현재 NavIC은 인도 및 인근 지역을 대상으로 지역 단문 메시지 서비스를 제공하고 있으며, BDS는 GEO 위성을 통해서 지구 전역, MEO 및 IGSO 위성을 통해서 중국 및 인근 지역을 대상으로 단문 메시지 서비스를 제공하고 있다.

II. 위성항법시스템별 신호 동향

1. GPS

초기 GPS는 L1 및 L2 대역을 통해 C/A 및 P(Y) 코드 신호만을 송출하였으나, 항법성능 향상 및 기타 이유로 현대화 과정이 수행되었고, 이 과정에서 개발된 현대화 항법신호를 legacy 신호와 함께 송출하고 있다. 표 1은 현재 송출되고 있는 GPS 항법신호별 주요 특성을 나열한다[12-15]. 표에서 PNT(O)는 공개 PNT 서비스, PNT(A)는 접근제한 PNT 서비스, ATH는 인증 서비스를 의미한다.

가. C/A, L2C, L5 및 L1C 신호

GPS 항법신호 중 민간을 대상으로 PNT 서비스

표 1 GPS 제공 서비스 및 항법신호 특성

주파수 대역	L1				L2				L5		
중심 주파수	1,575.42MHz				1,227.60MHz				1,176.45MHz		
서비스	PNT(O)	PNT(A)	PNT(A)	PNT(O)/ATH		PNT(O)	PNT(A)	PNT(A)	PNT(O)		
신호	L1 C/A	L1 P(Y)	L1M		L1C		L2C		L2 P(Y)	L5	
컴포넌트			Data	Pilot	Data	Pilot	Data	Pilot		Data	Pilot
확산 변조	BPSK (1)	BPSK (10)	BOC(10,5) (TDDM)	MBOC(6,1,1/11)		chip-by-chip TDM		BPSK (10)	BOC(10,5) (TDDM)	QPSK	
				BOC (1,1)	TMBOC (6,1,4/33)	BPSK (1)	BPSK (1)			BPSK (10)	BPSK (10)
코드 길이 [chips]	1,023	6.19 ×10 ¹²	N/A	10,230	10,230	10,230 (20ms)	767,250 (1.5s)	6.19 ×10 ¹²	N/A	10,230	10,230
항법메시지 구조	LNAV	LNAV	MNAV	CNAV-2	-	CNAV	-	LNAV	MNAV	CNAV	-
채널 코딩	-	-	N/A	BCH +LDPC	-	CC	-	-	N/A	CC	-
데이터속도 [sps]	50	50	N/A	100	-	50	-	50	N/A	100	-

를 제공하는 신호로는 C/A, L2C, L5 및 L1C 신호가 있다[16].

C/A 코드 신호는 P(Y) 코드 신호의 초기 획득을 보조하기 위해 설계되었으나, 1983년에 GPS가 민간에 개방된 이후에는 대부분의 상용 민간 수신기에서 GPS로부터 제공되는 PNT 정보를 빠르게 획득하기 위해 사용되고 있다[12].

L2C 신호는 GPS 현대화의 일환으로 개발된 첫 번째 항법신호로서, 이중 주파수의 사용 및 진보된 신호구조를 통해 GPS 사용자에게 향상된 항법성능을 제공하는 것을 목표로 설계되었다. C/A 코드 신호와 비교하여 pilot 컴포넌트, 긴 확산 코드, 새로운 항법메시지 구조(CNAV), 데이터 복조 성능 향상을 위한 CC(Convolutional Coding)의 사용을 특징으로 하며, 2005년부터 발사된 GPS IIR-M 위성에서부터 송출되고 있다[12].

L5 신호는 항공기와 같은 인명안전 교통수단 및

기타 고성능 어플리케이션을 위한 요구성능 충족을 목적으로 설계되었다. 이전의 민간 PNT 서비스 신호와 비교하여 10.23MHz의 높은 코드 칩 속도 및 Secondary 코드의 적용을 특징으로 하며, 2010년부터 발사된 GPS IIF 위성에서부터 송출되고 있다 [13].

L1C 신호는 항법성능 향상 및 Galileo 시스템과의 상호운용성 확보를 목적으로 설계되었다. 미국과 EU 간의 연구협력을 통해 개발된 L1C 신호의 MBOC(Multiplexed Binary Offset Carrier) 스펙트럼은 협대역 신호인 BOC(1,1)과 광대역 신호인 BOC(6,1) 성분을 함께 가지는 것을 특징으로 하며, L1C 신호는 MBOC 스펙트럼 구현을 위해 TMBOC(Time Multiplexed BOC) 기법을 사용하는 것을 특징으로 한다. 또한, L1C 신호는 데이터 복조 성능 향상을 위한 LDPC(Low Density Parity Check) 코딩 및 interleaving 기법, 새로운 항법메시지 구조(CNAV-2)의 사용

을 특징으로 하며, 2018년부터 발사된 GPS III 위성부터 송출되고 있다. 향후 Chimera(Chip Message Robust Authentication) 프로토콜을 이용하여 L1C 신호의 항법메시지 및 코드 인증 서비스를 제공할 예정이다[10,14].

나. P(Y) 및 M 코드 신호

P(Y) 및 M 코드 신호는 군용 수신기를 대상으로 높은 정확도의 PNT 서비스를 제공하며, 민간 사용자의 접근을 제한하기 위해 암호화되어 송출된다.

P(Y) 코드 신호는 C/A 코드 신호와 함께 legacy GPS 신호로 L1 및 L2 대역을 통해 송출되고 있으며, Y 코드로 암호화된 P 코드, 즉 P(Y) 코드를 확산 코드로 하여 높은 보안성 및 항기만 성능을 가진다. 또한, 우수한 항법성능을 위해 10.23MHz의 높은 코드 칩 속도를 가지는 것을 특징으로 한다[12].

M 코드 신호는 GPS 현대화 항법신호 중 유일한 군용신호로 미국과 동맹국들의 GPS 사용을 보호하

고 GPS의 적대적인 사용을 방지하는 것을 목적으로 개발되었다. P(Y) 코드 신호와 달리 BOC 변조를 사용하여 향상된 항법 및 항재밍 성능을 가지는 것을 특징으로 하며, 2005년 발사된 GPS IIR-M 위성부터 송출되고 있다[1,15].

2. GLONASS

초기 GLONASS 위성은 타 위성항법시스템과 다르게 FDMA(Frequency Division Multiple Access) 기반 항법신호만을 송출하였다. FDMA 기반 항법신호는 위성별로 분리된 반송파 주파수를 사용하여 시스템 내 간섭을 최소화할 수 있지만, CDMA(Code Division Multiple Access) 신호 대비 측위 정확도 및 협대역 간섭에 대한 저항 성능 측면에서 단점을 가진다[17,18]. GLONASS는 이를 극복하기 위해 현대화 과정에서 CDMA 신호를 개발하였으며, 현재 일부 신호를 송출하고 있다[19]. 표 2는 현재 송출 중이거

표 2 CDMA 기반 GLONASS 제공 서비스 및 항법신호 특성

주파수 대역	L1				L2				L3		L5	
중심 주파수	1,600.995MHz		1,575.42MHz		1,248.06MHz				1,202.025MHz		1,176.45MHz	
서비스	PNT(O)/SFT		PNT(A)		PNT(O)		PNT(A)		PNT(O)		PNT(O)	
신호	L1OC		L1SC		L1 OCM	L2OC		L2SC		L3OC		L5 OCM
컴포넌트	Data	Pilot	Data	Pilot		Data	Pilot	Data	Pilot	Data	Pilot	
확산 변조	chip-by-chip TDM		N/A		BOC (1,1)	chip-by-chip TDM		N/A		QPSK		BPSK (10)
	BPSK (1)	BOC (1,1)	BOC (5,2.5)	BOC (5,2.5)		BPSK (1)	BOC (1,1)	BOC (5,2.5)	BOC (5,2.5)	BPSK (10)	BPSK (10)	
코드 길이 [chips]	1,023 (2ms)	4,092 (8ms)	N/A	N/A	TBD	10,230 (20ms)	10,230 (20ms)	N/A	N/A	10,230	10,230	TBD
항법메시지 구조	string	-	N/A	N/A	TBD	string	-	N/A	N/A	string	-	TBD
채널 코딩	CC	-	N/A	N/A	TBD	CC	-	N/A	N/A	CC	-	TBD
데이터속도 [sps]	250	-	N/A	N/A	TBD	50	-	N/A	N/A	200	-	TBD

나 송출 예정인 GLONASS CDMA 항법신호별 주요 특성을 보여준다[20-24]. 표에서 SFT는 재난안전 서비스를 의미한다.

가. L1/L2/L3 OF 및 SF 신호

L1/L2 OF(Open FDMA) 및 SF(Secured FDMA) 신호는 FDMA 기반의 legacy GLONASS 신호이며, OF 신호는 민간 사용자, SF 신호는 허가된 사용자를 대상으로 PNT 서비스를 제공한다.

L1 OF 및 SF 신호는 $1,602+k \times 0.5625\text{MHz}$ (여기서 k 는 $-7, -6, \dots, +6$)를 반송파 주파수로 하는 14개의 채널을 통해 전송되며, 각 채널은 위성 번호에 따라 할당된다. 두 신호는 각각 0.511MHz 및 5.11MHz의 코드 칩 속도를 가지며, 모든 위성으로부터 송출되는 OF 및 SF 신호는 각각 동일한 확산 코드를 사용하는 것을 특징으로 한다[25].

L2 OF 및 SF 신호는 L1 OF 및 SF 신호와 유사한 신호 특성을 가지며, 반송파 주파수로 $1,246+k \times 0.4375\text{MHz}$ 를 사용한다는 차이점이 있다.

나. L1/L2/L3 OC 및 SC 신호

OC(Open CDMA) 및 SC(Secured CDMA) 신호는 각각 민간 사용자 및 허가된 사용자를 대상으로 PNT 서비스를 제공하는 GLONASS CDMA 신호이다.

L1, L2 및 L3 대역을 통해 송출되는 OC 신호는 공통적으로 Data 및 Pilot 컴포넌트를 포함한다. L1OC 신호의 스펙트럼은 인접 대역의 RAS(Radio Astronomy Service)로의 대역의 방사를 고려하여 설계되었으며[20], L2OC 신호는 이와 동일한 스펙트럼을 가진다[21,22]. 두 신호 모두 유연한 항법메시지 구조를 가지는 공통점이 있으며[23], L1OC 신호는 향후 회신링크를 포함한 탐색구조 서비스를 추가로 제공할 예정이다[8]. L3OC 신호는 L1OC 및 L2OC 신호와 다르게 10.23MHz의 높은 코드 칩 속도를

가지는 것을 특징으로 한다[24].

SC 신호는 L1 및 L2 대역을 통해 송출되며, OC 신호와 마찬가지로 Data 및 Pilot 컴포넌트를 가진다. 신호 특성상 극히 일부 정보만이 공개되었으며, 동일 대역 OC 신호와 비교하여 넓은 신호 대역폭을 가진다[19].

한편, OC 및 SC 신호들은 타 위성항법시스템과 다른 반송파 주파수를 사용하므로 상호운용성 측면에서 한계를 가진다. 따라서 상호운용성 향상을 위해 1,575.42MHz 및 1,176.45MHz를 반송파 주파수로 하여 공개서비스를 제공하는 OCM(Open CDMA Modernized) 신호 연구가 진행 중이다[19].

L3OC 신호는 GLONASS K 및 2014년 이후 발사된 GLONASS M 위성부터 송출되고 있으며, L1 및 L2 대역의 OC 및 SC 신호는 2023년 발사 예정인 GLONASS K2 위성부터 송출될 예정이다[19,26].

3. Galileo

Galileo 시스템은 GPS와 완전한 호환성을 가지면서 동시에 독립적으로 사용될 수 있고, GPS보다 향상된 항법성능을 목표로 개발되었다. 이에 따라 Galileo 항법신호는 GPS 신호와 호환성 및 상호운용성, 넓은 신호 대역폭 및 수신기 구현 복잡도 등을 높은 우선순위로 고려하여 설계되었다[27]. 표 3은 현재 송출 중인 Galileo 항법신호별 주요 특성을 나열한다[28-30]. 표에서 COR는 보정 서비스를 의미한다.

가. E1 OS 및 E5 신호

Galileo 항법신호 중 민간을 대상으로 PNT 서비스를 제공하는 신호로는 E1 OS(또는 E1-B/C) 및 E5(또는 E5a/b) 신호가 있으며, 모두 Data 및 Pilot 컴포넌트로 구성된다.

표 3 Galileo 제공 서비스 및 항법신호 특성

주파수 대역	L1(E1)			L6(E6)			L5(E5)			
중심 주파수	1,575.42MHz			1,278.75MHz			1,191.795MHz			
서비스	PNT(O)/ATH/SFT		PNT(A)	COR	ATH	PNT(A)	PNT(O)			
신호	E1OS		E1PRS	E6		E6PRS	E5a		E5b	
컴포넌트	E1-B (Data)	E1-C (Pilot)	E1-A	E6-B (Data)	E6-C (Pilot)	E6-A	E5a-I (Data)	E5a-Q (Pilot)	E5b-I (Data)	E5-Q (Pilot)
확산 변조	Combined on the same phase		BOC _{cos} (15,2.5)	Combined on the same phase		BOC _{cos} (10,5)	AltBOC(15,10)			
	CBOC+ (6,1,1/11)	CBOC- (6,1,1/11)		BPSK (5)	BPSK (5)		BPSK (10)	BPSK (10)	BPSK (10)	BPSK (10)
코드 길이 [chips]	4,092	4,092	N/A	5,115	5,115	N/A	10,230	10,230	10,230	10,230
항법메시지 구조	I/NAV	-	N/A	C/NAV	-	N/A	N/A	F/NAV	-	I/NAV
채널 코딩	CC	-	N/A	CC	-	N/A	N/A	CC	-	CC
데이터속도 [sps]	250	-	N/A	1,000	-	N/A	N/A	50	-	250

E1 OS 신호는 GPS와의 상호운용성 확보를 위해 L1C 신호와 동일한 MBOC 스펙트럼을 가지도록 설계되었으며, MBOC 스펙트럼 구현을 위해 CBOC(Composite BOC) 변조기법을 사용한다. E1 OS 신호의 Data 컴포넌트인 E1-B는 E5b 신호와 함께 수신할 때 빠른 TTFF(Time-to-First Fix)를 기대할 수 있는 I/NAV 항법메시지 구조를 사용하며, 항법 메시지를 통해 탐색구조 서비스의 회신링크 메시지를 제공한다[29]. 또한, OSNMA(Open Service Navigation Message Authentication) 프로토콜을 사용하여 항법메시지를 검증할 수 있는 인증 서비스를 제공할 예정이다[31].

E5 신호는 L2C 신호와 유사하게 이중 주파수 사용 및 차별화된 신호구조에 따른 항법성능 향상을 목표로 설계되었으며, 51.15MHz의 넓은 대역폭을 사용한다. E5 신호는 서로 다른 중심 주파수를 가지는 E5a 및 E5b 신호로 구성되며, 각각 직교 위상에 Data 및 Pilot 컴포넌트를 가진다. E5 신호의 가장 큰

특징인 AltBOC(Alternative BOC) 변조기법은 이 4개의 컴포넌트를 다중화하기 위해 개발되었는데, 구현이 용이하고, 상측파대 및 하측파대를 통해 서로 다른 신호를 전송할 수 있으며, 수신기는 각 측파대 신호를 각각 사용할 수 있다는 장점이 있다[32]. 또한, E5a 신호는 L5 신호와 동일한 반송파 주파수 및 스펙트럼을 가지므로 GPS와의 상호운용성을 제공한다.

나. E1/E6 PRS 신호

PRS(Public Regulated Service) 신호는 EU 회원국으로부터 허가받은 사용자를 대상으로 향상된 PNT 서비스를 제공하는 암호화된 항법신호로, E1 및 E6 대역을 통해 송출된다[31].

E1 PRS(또는 E1-A) 및 E6 PRS(또는 E6-A) 신호는 그 특성상 스펙트럼과 관련된 일부 정보만 공개되었다. E1 PRS 신호는 GPS P(Y) 및 M 코드 신호, E6 PRS 신호는 동일 대역 민간 사용자 대상 서비스인 E6 CS(Commercial Service) 신호와의 스펙트럼 분리를

고려하였으며, 향상된 항법성능을 위해 넓은 신호 대역폭을 갖도록 설계되었다[30]. 그 결과, E1 PRS 및 E6 PRS 신호는 항법신호 중 유일하게 cosine 위상 부반송파를 사용하는 BOCcos(15,2.5) 및 BOCcos(10,5) 변조기법이 적용되었다.

다. E6 CS 신호

E6 CS(또는 E6-B/C) 신호는 유료 사용자를 대상으로 높은 정확도 및 강건성을 제공하기 위한 상업적 목적하에 개발되었다.

E6-B 컴포넌트는 센티미터급 보정정보를 전송하는 HAS(High Accuracy Service)를 제공하며, 1,000sps의 높은 데이터전송속도 및 Galileo 항법메시지 구조 중 가장 큰 최소 블록을 가지면서 내용 변경이 용이한 C/NAV 항법메시지 구조를 사용한다. HAS는 2023년 1월부터 Phase 1에 해당하는 초기 서비스를

제공하고 있으며, E6 CS 신호 개발 초기의 서비스 운영 계획과 달리 무료로 제공되고 있다[9,33].

E6-C 컴포넌트는 암호화된 확산 코드를 통해 E1-B 컴포넌트의 항법메시지 인증 서비스인 OSNMA와 보완적인 코드 인증 서비스 CAS(Commercial Authentication Service)를 2025년부터 제공할 예정이다[34].

4. BDS

BDS는 세 단계에 걸쳐 개발이 진행되었으며, 각 단계에서 새로운 항법신호가 개발되었다. 현재 2단계(BDS-2) 및 3단계(BDS-3)에 해당하는 위성만 가동되고 있으며, 표 4는 SBAS 신호를 제외한 BDS-3 위성에서 송출 중인 항법신호별 주요 특성을 나열한다[11,35,36]. 표에서 MSG는 단문 메시지 서비스를

표 4 BDS-3 제공 서비스 및 항법신호 특성

주파수 대역	L1(B1)			L6(B3)			L5(B2)				S		
중심 주파수	1,561.098MHz			1,268.52MHz			1,191.795MHz				1,575.42MHz		
서비스	PNT(O)	PNT(O)/COR		PNT(A)	PNT(O)	PNT(A)	PNT(A)	PNT(O)		PNT(O)/COR /SFT/MSG		MSG	
신호	B1I	B1C		B1A	B3I	B3Q	B3A	B2a		B2b		Bs	
컴포넌트	Data	Data	Pilot	N/A				Data	Pilot	Data	Pilot	I	Q
확산 변조	BPSK (2)	MBOC(6,1,1/11)		BOC (14,2)	QPSK		QPSK (10)	ACEBOC(15,10, [1,1,0,1])				OQPSK (4.08MHz)	
		BOC (1,1)	QMBOC (6,1,4/33)		BPSK (10)	BPSK (10)		BPSK (10)	BPSK (10)	TBD			
코드 길이 [chips]	2,406	10,230	10,230	N/A	10,230	N/A	N/A	10,230	10,230	10,230	TBD	255	2 ²¹ -1
항법메시지 구조	D1/D2	B-CNAV1	-	N/A	D1/D2	N/A	N/A	B-CNAV2	-	B-CNAV3	TBD	-	
채널 코딩	BCH	BCH+LDPC	-	N/A	BCH	N/A	N/A	LDPC	-	LDPC	TBD	CC	
데이터속도 [sps]	50/500	100	-	N/A	50/500	N/A	N/A	200	-	1,000	TBD	16,000	

의미한다.

가. B1/B2/B3 I/Q 신호

BDS-2 위성은 B1, B2 및 B3 대역을 통해 항법 신호를 송출하고 있으며, 공통적으로 in-phase(B1I, B2I, B3I)에는 민간 사용자, quadrature-phase(B1Q, B2Q, B3Q)에는 허가된 사용자를 대상으로 한 신호를 송출한다. B1I/Q 및 B2I 신호는 2.046 MHz, B2Q 및 B3I/Q 신호는 10.23MHz의 코드 칩 속도를 가지며, quadrature 성분에 해당하는 B1Q, B2Q 및 B3Q 신호에 대해서는 공개된 정보가 거의 없다.

BDS는 유일하게 중궤도 위성을 포함한 Hybrid Constellation을 가지고 있으며, 이를 적극적으로 활용하여 동일한 신호 스펙트럼을 통해 각 궤도별로 다른 서비스를 제공하고 있다[37]. BDS-2 중궤도 및 지구경사동기궤도 위성에서 송출되는 in-phase 신호는 D1 항법메시지 구조를 가지며 PNT 서비스를 제공하는 반면, 정지궤도 위성으로부터 송출되는 in-phase 신호는 D2 항법메시지 구조를 가지며 BDS 무결성, 전리층 격자 정보 등의 정보를 통해 PNT뿐만 아니라 보정 서비스도 제공한다[38].

2023년 1월 현재 15기의 BDS-2 위성이 정상 작동하고 있으며, B1I 및 B3I/Q 신호는 BDS-3 위성에서도 이어서 송출되고 있다[36,39].

나. B1C 및 B2 신호

B1C 및 B2 신호는 BDS-3 구축 과정에서 민간 사용자를 대상으로 개발된 항법신호이며, 타 위성항법시스템과의 상호운용성을 위해 GPS 또는 Galileo 신호와 동일한 반송파 주파수를 사용한다.

B1C 신호는 GPS L1C 신호와 같이 다른 위성항법시스템과의 상호운용성 향상을 목적으로 설계되었으며, MBOC 스펙트럼 구현을 위해 QM-BOC(Quadrature Multiplexed BOC) 변조기법을 사용

하는 것을 특징으로 한다[40].

BDS-3는 정지궤도 위성 3기, 지구경사동기궤도 위성 3기, 중궤도 위성 24기로 구성된다. BDS-3 정지궤도 위성에 탑재된 SBAS 중계기에서는 B1C 신호(또는 BDSBAS-B1C 신호)를 통해 SBAS 서비스를 제공하며, 중궤도 및 지구경사동기궤도 위성에서는 B1C 신호를 통해 PNT 서비스를 제공한다.

B2 신호는 E5 신호와 유사한 신호구조 및 스펙트럼을 가지므로 Galileo와의 상호운용성을 가진다. B2 신호는 B2a 및 B2b 신호로 구성되며, 각각 직교 위상에 Data 및 Pilot 컴포넌트를 가진다. B2 신호는 이 4개의 신호를 다중화하기 위해 개발된 ACEBOC(Asymmetric Constant Envelope Binary Offset Carrier) 변조기법이 적용되었으며, 이는 E5 신호의 AltBOC 변조기법과 비교하여 전력 할당 및 신호 수신 기법 측면에서 더 높은 유연성을 가진다[40]. BDS-3 정지궤도 위성은 B2a 신호(또는 BDSBAS-B2a 신호)를 통해 SBAS 서비스, B2b 신호(또는 PPP-B2b 신호)를 통해 PPP 보정 서비스를 제공하며, 중궤도 및 지구경사동기궤도 위성에서는 B2a 신호를 통해 PNT 서비스, B2b 신호를 통해서도 PNT, 전 지구 단문 메시지 서비스 및 SAR의 회신링크 메시지를 제공한다[37].

다. B1A 및 B3A 신호

B1A 및 B3A 신호는 차세대 BDS 군용 항법신호로 허가된 사용자에게만 높은 정확도의 PNT 서비스를 제공하며, 반송파 주파수 및 스펙트럼 외에 신호 관련 정보는 공개되어 있지 않다.

B1A 신호는 기존 B1 대역 군용 신호인 B1Q 신호와의 하위호환을 위해 B1A 신호 스펙트럼의 하측 파대 성분이 B1Q 신호의 스펙트럼과 거의 일치하도록 설계되었다. B3A 신호 역시 기존 군용 신호인 B3Q 신호와 동일한 변조기법이 적용되었다[36].

라. Bs 신호

Bs 신호는 중국 및 인근 지역을 대상으로 하는 단문 메시지 서비스(RSMC: Regional Short Message Communication)를 제공하는 out-bound 신호이다. Bs 신호는 시간당 6,000,000회의 단문 메시지 서비스를 제공할 수 있으며, 메시지당 최대 14,000bits (약 1,000개의 중국 문자)를 전송할 수 있다[41]. 반송파 주파수로는 2,491.75MHz를 사용하며, 코드 칩 속도를 4.08MHz로 하여 OQPSK(Offset Quadrature Phase Shift Keying) 변조된다. Bs 신호는 BDS-1 위성부터 BDS-3 위성까지 이어서 사용되고 있으며, GEO 위성에서만 송출된다[11].

5. QZSS

QZSS는 일본 및 인근 지역에서 GPS를 보완하기 위해 개발되었으며, GPS 항법신호와 거의 동일한 항법신호와 독자 개발한 항법신호를 함께 송출하고 있다. 표 5는 QZSS에서 송출 중인 독자 항법신호의 주요 특성을 나열한다[11].

가. L1C/A, L1C/B, L1C, L2C, L5 신호

QZSS에서는 L1, L2 및 L5 대역을 통해 GPS L1 C/A, L2C, L5 및 L1C 신호와 동일한 구조의 항법신호를 위성 식별 번호만 다르게 하여 송출하고 있으며, 이 신호들은 공개된 PNT 서비스를 제공한다. QZSS의 GPS-like 신호 송출은 GPS와의 상호운용성 확보 측면에서 매우 큰 장점을 가져왔으나, GPS L1 C/A 신호로의 무시할 수 없는 크기의 간섭을 야기하였다. 따라서 이를 완화하기 위해 BOC(1,1) 변조를 사용하고, 이외의 신호구조는 동일한 L1 C/B 신호를 추가 개발하였으며, QZS-1R 이후에 발사되는 위성부터 L1 C/B 신호를 송출할 예정이다[42].

표 5 QZSS 제공 서비스 및 항법신호 특성 (GPS-like 및 SBAS 신호 제외)

주파수 대역	L1	L6		L5	
중심 주파수	1,575.42 MHz	1,278.75MHz		1,176.45MHz	
서비스	COR	COR	COR	PTVS	
신호	L1S	L6		L5S	
컴포넌트		L6D	L6E	Data	Pilot
확산 변조	BPSK (1)	chip-by-chip TDM		QPSK	
		BPSK (5)	BPSK (5)	BPSK (10)	BPSK (10)
코드 길이 [chips]	1,023	10,230 (4ms)	10,230 (4ms)	10,230	10,230
항법메시지 구조	L1S	L6D	L6E	L5S	
채널 코딩	CC	RS	RS	CC	
데이터속도 [sps]	500 (250bps)	250 (2,000bps)	250 (2,000bps)	500	

나. L1S 및 L6 신호

L1S 및 L6 신호는 측위성능 향상을 위한 보정 정보 제공을 목적으로 설계된 항법신호이다.

L1S(또는 L1-SAIF) 신호는 미터급 보정서비스를 제공하며, 지진이나 쓰나미와 같은 재난이 발생하였을 때 항법메시지를 통해 DCR(Disaster Crisis Report)을 전송하여 재난안전 서비스를 제공한다. 항법메시지 외에는 L1 C/A 코드 신호와 동일한 신호구조를 가지며, 보정 정보 전달이 주목적이므로 500sps의 높은 데이터전송속도를 특징으로 한다.

L6 신호는 센티미터급 보정 서비스를 제공하며, L6D 및 L6E 컴포넌트로 구성된다. L6D 컴포넌트는 일본 본토만을 대상으로 PPP-RTK 기반의 CLAS(Centimeter Level Augmentation Service)를 제공하며, L6E 컴포넌트는 보다 확장된 영역을 대상으로 PPP 기반의 MADOCA-PPP를 제공한다. 두 컴포

넌트는 L2C 신호와 같이 chip-by-chip TDM 방식으로 다중화되며, Galileo의 E6 HAS 신호와 동일한 스펙트럼을 가지므로 센티미터급 보정 신호 간 상호운용성을 가진다. 또한, 각 컴포넌트는 CSK(Code Shift Keying) 변조를 통해 각각 2,000bps의 매우 높은 데이터전송속도를 가진다.

다. L1Sb 신호

일본은 MSAS를 통해 SBAS 서비스를 제공하고 있었으나, QZSS 개발이 진행되면서 MSAS 위성을 따로 두지 않고 QZSS 위성에 SBAS 중계기를 탑재하여 L1Sb 신호를 송출하는 방식으로 SBAS 서비스를 제공하고 있다[43]. L1Sb 신호는 SBAS 신호이므로 ICAO 표준 규격에 해당하는 신호구조를 가지며, L1 C/A 신호와 동일한 스펙트럼을 가진다.

라. L5S 및 Q-ANPI 신호

L5S 신호는 새로운 고정밀 측위 기술을 개발하고 이를 실제 위성 신호를 통해 검증할 수 있는 실험 체

널을 제공하는 것을 목적으로 하는 PTVS(Positioning Technology Verification Service)를 제공한다. L5 신호와 매우 유사한 신호구조를 가지며, 다양한 측위 기술의 적용을 위해 항법메시지 내용의 변경이 가능한 것을 특징으로 한다.

Q-ANPI 신호는 재난 발생 시에 S 대역을 통해 피난처에 대한 정보 또는 상황을 QZSS 정지궤도 위성을 이용하여 지상 제어국으로 중계하는 일종의 재난안전 서비스를 제공하는 것을 목적으로 서비스 개발을 논의 중이며, 아직 신호구조에 대해서는 정보가 공개되어 있지 않다.

6. NavIC

NavIC은 GPS 의존도를 낮추는 것을 목표로 개발되었다. 기존 NavIC 위성에서는 L5 및 S 대역만을 통해 항법신호를 송출하였으나, 최근 L1 대역 항법신호를 추가하였다. 표 6은 송출 중이거나 송출 예정인 NavIC 항법신호별 주요 특성을 나열한다[11,44].

표 6 NavIC 제공 서비스 및 항법신호 특성

주파수 대역	L1		L5			S		
중심 주파수	1,575.42MHz		1,176.42MHz			2,492.028MHz		
서비스	PNT(O)		PNT(O)/SFT/MSG	PNT(A)		PNT(O)/SFT/MSG	PNT(A)	
신호	L1 SPS		L5 SPS	L5 RS		S SPS	S RS	
컴포넌트	Data	Pilot		Data	Pilot		Data	Pilot
확산 변조	MBOC(6,1,1/11)		BPSK(1)	QPSK		BPSK(1)	QPSK	
	SBOC Data	SBOC Pilot		BOC(5,2)	BOC(5,2)		BOC(5,2)	BOC(5,2)
코드 길이 [chips]	10,230	10,230	1,023	N/A	N/A	1,023	N/A	N/A
항법메시지 구조	L1 SPS	-	IRNSS	N/A	N/A	IRNSS	N/A	N/A
채널 코딩	BCH+LDPC	-	CC	N/A	N/A	CC	N/A	N/A
데이터속도 [sps]	100	-	50	N/A	N/A	50	N/A	N/A

가. L5/S SPS 및 L1C 신호

NavIC은 L5 및 S 대역을 통해 동일한 구조의 공개 PNT 서비스 항법신호를 송출하며, 각각 L5 SPS 및 S SPS 신호로 명명한다. 신호구조는 GPS C/A 코드 신호와 유사하며, 데이터복조성능 향상을 위해 CC가 적용되었다. L5 및 S SPS 신호는 지상 이동통신망의 이용이 어려운 해상지역이나 오지의 사용자에게 NavIC 위성을 통한 단문 메시지 서비스를 제공하는 데도 사용되고 있으며[45], 이 기능을 통해 INCOIS(Indian Nation Centre for Ocean Information Services)라고 하는 재난재해 정보 메시지를 방송하여 재난안전 서비스를 제공한다[46].

L1C 신호는 타 위성항법시스템과 마찬가지로 상호운용성 확보를 위해 설계된 PNT 서비스 신호로, MBOC 스펙트럼 구현을 위해 SBOC(Synthesized BOC) 변조기법을 개발하여 사용하고 있다[44,47].

나. L5/S RS 신호

허가된 사용자만을 대상으로 하는 L5 및 S 대역 RS(Restricted Service) 신호 또한 두 대역에서 동일한 신호구조를 가지며, SPS 신호 대비 향상된 PNT 성능을 제공하는 것을 목적으로 한다. 단, S 대역의 가용 대역폭(16.5MHz)이 매우 좁은 관계로 타 시스템의 접근제한 신호보다 좁은 신호 대역폭을 가지며, 반송파 주파수 및 스펙트럼 외에 다른 신호구조에 대한 정보는 공개되어 있지 않다.

III. 결론

본고에서는 현재 운용되고 있는 위성항법시스템에서 제공하는 서비스 및 송출 항법신호에 대하여 기술하였다. 공개 PNT 서비스의 경우에는 저가 상용 수신기를 대상으로 하므로 좁은 신호 대역폭을 특징으로 하며, 인증 서비스를 제공하는 방향

으로 부분적 개선이 진행되고 있다. 접근제한 PNT 서비스는 민간에서의 접근을 제한하기 위해 암호화된 확산 코드 사용을 공통점으로 하며, 높은 측위 성능 확보를 위해 넓은 신호 대역폭을 가진다. 보정 서비스는 보정 정보 전달을 목적으로 하므로 높은 데이터전송속도를 특징으로 하며, 재난안전 서비스는 PNT 항법신호의 항법메시지에 포함되는 COSPAS-SARSAT 회신링크메시지를 통해 제공된다. 단문 메시지 서비스의 경우, BDS만 국지서비스를 위해 전용 링크를 가지며 글로벌 서비스는 공개 PNT 항법신호의 항법메시지를 통해 제공되므로 별도의 신호구조적인 특징을 가지지는 않는다.

이와 같은 기존 위성항법시스템의 서비스 및 항법신호 별 특징은 향후 한국형 위성항법시스템의 위성궤도별 서비스 제공 방안 및 항법신호 설계 시 참고할 필요가 있다.

약어 정리

ACEBOC	Asymmetric Constant Envelope Binary Offset Carrier
AltBOC	Alternative Binary Offset Carrier
BDS	BeiDou satellite navigation System
CAS	Commercial Authentication Service
CC	Convolutional Coding
CDMA	Code Division Multiple Access
Chimera	Chip Message Robust Authentication
CLAS	Centimeter Level Augmentation Service
CS	Commercial Service
CSK	Code Shift Keying
DCR	Disaster Crisis Report
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HAS	High Accuracy Service
ICAO	International Civil Aviation Organization

INCOIS	Indian Nation Centre for Ocean Information Services	
KPS	Korean Positioning System	
LDPC	Low Density Parity Check	
MBOC	Multiplexed Binary Offset Carrier	
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System	
NavIC	Navigation with Indian Constellation	
NTS-3	Navigation Technology Satellite-3	
OC	Open CDMA	
OCM	Open CDMA Modernized	
OF	Open FDMA	
OQPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying	
OS	Open Service	
OSNMA	Open Service Navigation Message Authentication	
PNT	Positioning, Navigation and Timing	
PRS	Public Regulated Service	
PTVS	Positioning Technology Verification Service	
QMBOC	Quadrature Multiplexed Binary Offset Carrier	
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System	
RAS	Radio Astronomy Service	
RS	Restricted Service	
RSMC	Regional Short Message Communication	
SBAS	Satellite Based Augmentation System	
SBOC	Synthesized Binary Offset Carrier	
SC	Secured CDMA	
SF	Secured FDMA	
T ^T FF	Time-to-First Fix	
WAAS	Wide Area Augmentation System	

참고문헌

- [1] <https://www.gps.gov/systems/gps/space/#generations>
- [2] Maintenance, Development and Use of GLONASS for the Period 2012-2020.
- [3] J. Benedicto and R. Costa, Directions 2021: Galileo expands and modernizes global PNT, <https://www.gpsworld.com/directions-2021-galileo-expands-and-modernizes-global-pnt/>
- [4] Development of the BeiDou Navigation Satellite System (ver. 3.0), 2018.
- [5] Kenji NUMATA, QZSS Status Update, International Committee on GNSS (ICG) 16th meeting, Oct. 2022.
- [6] ISRO, Satellite Navigation Services, <https://www.isro.gov.in/SatelliteNavigationServices.html>
- [7] <https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=eng&mlid=4&mPid=2&bbsSeqNo=42&nttSeqNo=568>
- [8] I. Revniviykh, "GLONASS status and prospects of development," in Proc. Int. Comm. Glob. Navig. Satellite Syst. (ICG-16), (Abu Dhabi, United Arab Emirates), Oct. 2022.
- [9] <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-open-service-navigation-message-authentication-osnma>
- [10] J. Hinks et al., "Signal and data authentication experiments on NTS-3," in Proc. ION GNSS+ 2021, (St. Louis, MO, USA), Sept. 2021, pp. 3621-3641.
- [11] Y.J. Morton et al., Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications, vol. 1, Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2020.
- [12] IS-GPS-200, Revision N, Aug. 2022.
- [13] IS-GPS-705, Revision J, Aug. 2022.
- [14] IS-GPS-800, Revision J, Aug. 2022.
- [15] B.B. Barker et al., "Overview of the GPS M code signal," in Proc. ION NTM, (Anaheim, CA, USA), Jan. 2000, pp. 542-549.
- [16] <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>
- [17] B.A. Stein et al., "PRN codes for GPS/GLONASS: A comparison," in Proc. ION NTM, (San Diego, CA, USA), Jan. 1990, pp. 31-35.
- [18] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/CDMA_FDMA_Techniques
- [19] P.J. Teunissen et al., Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer, Cham, Switzerland, 2017.
- [20] Y. Urlichich et al., "GLONASS developing strategy," in Proc. ION GNSS 2010, (Portland, OR, USA), Sept. 2010, pp. 1566-1571.
- [21] ICD GLONASS CDMA L1, Edition 1.0, 2016.
- [22] ICD GLONASS CDMA L2, Edition 1.0, 2016.
- [23] S. Karutin, "GLONASS signals and augmentations," in Proc. ION GNSS 2012, (Nashville, TN, USA), Sept. 2012, pp. 3878-3911.
- [24] ICD GLONASS CDMA L3, Edition 1.0, 2016.

- [25] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Signal_Plan
- [26] https://space.skyrocket.de/doc_sdat/uragan-k2.htm
- [27] B. Eissfeller et al., "Requirements on the Galileo signal structure," in Proc. ION GPS 2000, (Salt Lake City, UT, USA), Sept. 2000, pp. 1772-1781.
- [28] E6-B/C Codes Technical Note, no. 1, Jan. 2019.
- [29] OS SIS ICD, no. 2.0, Jan. 2021.
- [30] J.-A. Avila-Rodriguez et al., "The MBOC modulation: The final touch to the Galileo frequency and signal plan," Navigation, vol. 55, 2008, pp. 15-28.
- [31] <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services>
- [32] G.W. Hein et al., "Status of Galileo frequency and signal design," in Proc. ION GPS 2002, (Portland, OR, USA), Sept. 2002, pp. 266-277.
- [33] <https://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/galileo-commercial-service-implementing-decision-enters-force>
- [34] J. Godet, "Galileo status," Munich Satellite Navig. Summit 2022, Mar. 2022.
- [35] BDS-SIS-ICD-B2b, ver. 1.0, Jul. 2020.
- [36] ITU-R M.1787-4, International Telecommunications Union, Geneva, Switzerland, Jan. 2022.
- [37] CSNO, "Development of the BeiDou navigation satellite system," ver. 4.0, Dec. 2019.
- [38] BDS-SIS-ICD, ver. 2.1, Nov. 2016.
- [39] <http://csno-tarc.cn/en/system/constellation>
- [40] M. Lu et al., "Overview of BDS III new signals," Navigation, vol. 66, 2018, pp. 19-35.
- [41] CSNO, The Application Service Architecture of BeiDou Navigation Satellite System, ver. 1.0, Dec. 2019.
- [42] S. Kogure, "Update of QZSS," in Proc. ION GNSS+ 2021 (St. Louis, MO, USA), Sept. 2021, pp. 1228-1240.
- [43] https://www.icao.int/Meetings/anconf13/Documents/WP/wp_249_en.pdf
- [44] ISRO-IRNSS-ICD-SPS-L1, ver. 1.0(draft), Oct. 2022.
- [45] https://en.wikipedia.org/wiki/Indian_Regional_Navigation_Satellite_System
- [46] ISRO-IRNSS-ICD-MSG-INCOIS, ver. 1.2, June 2020.
- [47] D. Upadhyay and V.S. Bhadouria, "Overview of new NavIC L1 SPS signal structure & SBOC modulation and modified-CEMIC multiplexing scheme," in Proc. Int. Comm. Glob. Navig. Satellite Syst. (ICG-15), (Vienna, Austria), Sept. 2021.